

令和 6 年 6 月 23 日現在

機関番号：24201
 研究種目：基盤研究(C)（一般）
 研究期間：2020～2023
 課題番号：20K04289
 研究課題名（和文）ザトウクジラの胸ビレを模した前縁波形状翼の羽ばたき運動による流体力発生機構の解明

研究課題名（英文）Study on the mechanism of hydrodynamic force generation by flapping motion of a wing with leading edge protuberance imitating the pectoral fin of a humpback whale

研究代表者
 安田 孝宏（Yasuda, Takahiro）
 滋賀県立大学・工学部・准教授

研究者番号：60347432
 交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、ザトウクジラの胸ビレを模した前縁波形状翼の運動時の流体力特性に着目し、その非定常流体力発生機構の解明を目的として調査を行った。ヒービング、ピッチング、フラッピング運動を実現できる実験装置を製作し、前縁波形状翼および比較対象である前縁直線翼の翼性能や流れ場を調査した。その結果、前縁直線翼の場合、翼の運動により剥離が抑制され、静止翼よりも高い揚力が得られることを明らかにした。また、前縁波形状翼はどの運動条件でも振動が少なく高い揚力を出せることから、魚型水中ロボットに適している可能性が高いことがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義
 従来の前縁波形状翼に関する研究は固定した翼を対象にしており、羽ばたき運動する前縁波形状翼を取り扱った研究は無い。そのため、本研究で明らかにした前縁波形状翼の運動時の流体力特性や非定常揚力発生メカニズムは新たな重要な知見である。また、前縁波形状翼がどの運動条件においても変動が少なく、かつ、高い揚力を出せることを示した結果は、効率的な魚型水中調査機器の開発の一助となることが期待できる。

研究成果の概要（英文）：In this study, we focused on the fluid dynamic force characteristics on a moving wing with leading edge protuberance that imitates the pectoral fins of a humpback whale, and conducted an investigation to clarify the mechanism by which unsteady fluid dynamic forces are generated. An experimental device capable of realizing heaving, pitching, and flapping motions was constructed, and the wing performance and flow fields of a wing with leading edge protuberance and a wing with straight leading edge were investigated. As a result, it was found that in the case of a wing with straight leading edge, separation is suppressed by the wing motion, and a higher lift can be obtained than a static wing. Furthermore, since a wing with leading edge protuberance can generate a stable high lift under any motion conditions, it was found to be highly suitable for a fish-type underwater robot.

研究分野：流体力学

キーワード：前縁波形状翼 非定常流体力 フラッピング運動 ピッチング運動 ヒービング運動 NACA0012

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

海洋や海底に存在する潜在的なエネルギーや鉱物資源の調査，地球環境問題のデータ収集のために，自律行動型水中ロボット AUV(Autonomous Underwater Vehicle)の開発が行われている。従来用いられているスクルー方式の推進機構は，海草の巻き込みや正負の推力の迅速な切替が不可能等の欠点のため，近年，水棲生物の泳動機構を模した魚型の AUV が注目されている。そこで，機動性に優れたザトウクジラの胸ビレを模した前縁波形状翼を魚型 AUV に応用することで機器の高性能化を実現できると考えた。従来の研究では運動する前縁波形状翼の流体力特性を調査した例がないため，前縁波形状翼の非定常流体力特性やその発生メカニズムの解明が必要である。

2. 研究の目的

ヒービング運動，ピッチング運動およびフラッピング運動する前縁波形状翼および比較対象となる前縁直線翼に作用する翼性能を調査することで，翼の運動や，前縁形状が非定常流体力に与える影響について明らかにする。また，流れの可視化により，翼の運動や前縁形状が流体力発生機構にどのような影響を与えるのかを解明する。

3. 研究の方法

(1) 流体力測定装置の製作

風洞装置試験部に電動スライダおよびステッピングモーターを設置し，翼のヒービング運動，ピッチング運動およびフラッピング運動を可能にした。

(2) 供試翼モデル

翼モデルには，翼弦長 $c=110$ mm，アスペクト比 $b/c=1.8$ (b は翼幅) の矩形翼を用いた。供試モデルとして，前縁波形状翼(Wave)および比較対象として前縁直線翼(Baseline)を用いた。翼断面形状には NACA0012 を用い，翼平面形状は翼弦長 $c=110$ mm，翼幅 $b=198$ mm の矩形翼とし，それぞれの翼を 3D プリンターで作成した。前縁波形状翼の波長 λ と振幅 A は本研究の先行研究で良い性能が得られた $A=0.05c$ ， $\lambda=0.2c$ を用いた。

(3) 流体力の測定

翼性能測定実験では，翼弦長と一様流 (6.0 m/s) に基づく Re 数を $Re=4.32 \times 10^4$ に設定し，翼に作用する流体力を測定した。翼の運動時には翼自身の慣性力もセンサに加わるため，測定値から無風でピッチング運動させたときの力を差し引いて流体力を評価した。

(4) 流れの可視化

流れの可視化はスモークワイヤ法を用いて行った。可視化用ワイヤは翼後縁から 5 mm 下流側の位置に鉛直方向に張った。発煙剤には流動パラフィンを用いた。撮影は高速度カメラ (1000fps) を用い，光源には出力 1W のレーザーシート光を使用した。また，可視化実験では，煙の濃度確保のため一様流速を流体力測定時の 0.67 倍とし，その際， Re 数と無次元周波数が流体力測定時と同じになるように翼のサイズや運動の周期を調整した。

4. 研究成果

(1) ピッチング運動時の流体力特性と流体力発生メカニズム

Baseline の場合では，ピッチング角度振幅 α_p やピッチング周波数 f_p が増加すると時間平均揚力が増加し， $f_p=1.75$ Hz， $\alpha_p=7.5^\circ$ の条件で最大となることがわかった。特に，ピッチング周波数が増加するにつれて，アップストローク時に高迎角まで剥離が抑制されるため，準定常揚力を超える大きな揚力が生じて時間平均揚力が大きくなることがわかった (図1)。また，ピッチング振幅が $\alpha_p \geq 10.0^\circ$ になるとピッチング振幅の増加とともに時間平均揚力が減少することがわかった。この原因は，ピッチング振幅が大きい条件では，ダウンストロークからアップストロークに切り替わる位相で迎角が小さくなり，翼上面の負圧が弱まるためであることがわかった (図2)。

Wave の場合では，静止翼でも剥離が抑制され高い揚力となるため，ピッチング運動した場合の揚力の静止翼に対する増加割合はBaselineに比べて小さく (図3)，揚力に対するピッチング振幅やピッチング周波数の影響も小さくなった。ただし，ピッチング振幅が大きい条件になると，Baselineと同様に，ダウンストロークからアップストロークに切り替わる位相で翼の迎角が小さくなりBaselineと同様に時間平均揚力が減少することがわかった (図4)。可視化結果より，Wave の場合にはピッチング運動による非定常揚力が生じるが，運動条件に関わらずBaselineよりも剥離が抑制されるため (図5)，揚力変動が減少しBaselineよりも高い揚力が維持されることがわかった。

さらに，2次元渦無し流れを仮定した解析結果より，剥離の生成領域が限定されるWave の場

合においても、剥離に起因する非定常流体力が支配的であることがわかった。

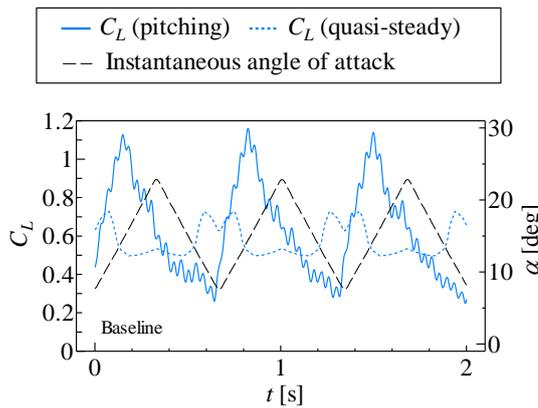


図1 揚力の時間変化 ($f_p=1.5$ Hz, $\alpha_p=7.5^\circ$)

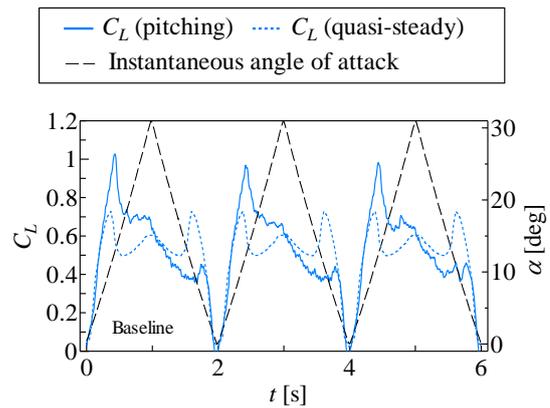


図2 揚力の時間変化 ($f_p=0.5$ Hz, $\alpha_p=15^\circ$)

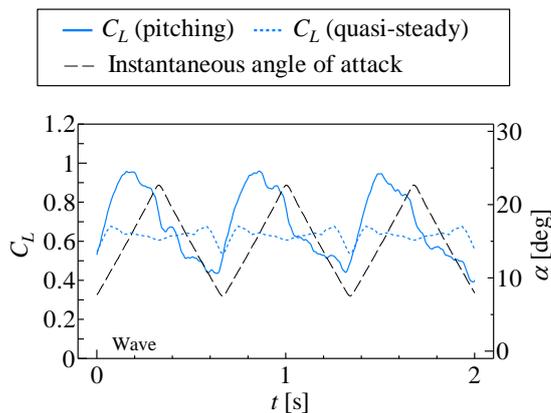


図3 揚力の時間変化 ($f_p=1.5$ Hz, $\alpha_p=7.5^\circ$)

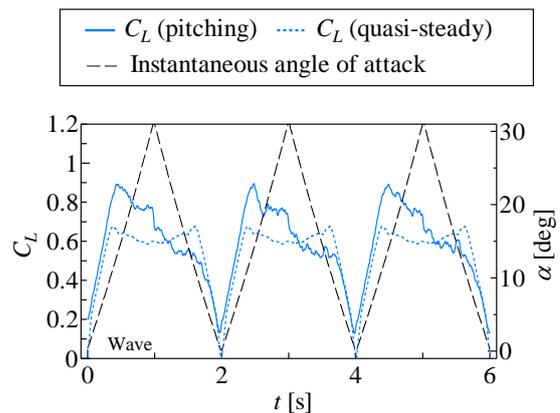


図4 揚力の時間変化 ($f_p=0.5$ Hz, $\alpha_p=15^\circ$)

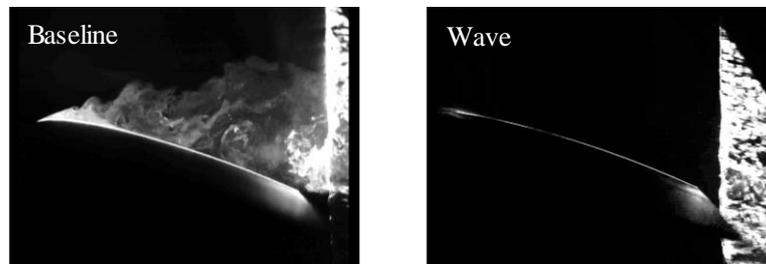


図5 翼周りの流れ場の比較 ($f_p=1.5$ Hz, $\alpha_p=7.5^\circ$)

(2) ヒービング運動時の流体力特性と流体力発生メカニズム

ヒービング運動する **Baseline** では、ヒービング周波数 $f_h=1.0$ Hz 以上、ヒービング振幅 $a_h=5.0$ mm 以上の広い条件で静止翼よりも時間平均揚力が大きくなることがわかった。また、**Baseline** および **Wave** の静止翼に対する揚力の増加率 $C_{L,R}$ は最大ヒービング速度によって整理できることがわかった。特に、ヒービング運動する **Baseline** の場合、ヒービング速度が大きい条件で運動させると、アップストーク時に剥離が抑制され、翼上面の流れが付着する時間が長くなるため、 $C_{L,R}$ が大きくなることがわかった (図 6 左, 図 7 上)。

ヒービング運動させた **Wave** の場合、ヒービング振幅・周波数の条件によらず、剥離が抑制されるため、静止翼の場合と同様に高い揚力が維持でき、揚力の振動振幅も **Baseline** に比べて減少することがわかった (図 6 右, 図 7 下)。その結果として、 $C_{L,R}$ の条件間の変動が **Baseline** より小さくなることがわかった。

(3) フラッピング運動時の流体力特性と流体力発生メカニズム

フラッピング運動する場合、**Baseline**、**Wave** の揚力の時間変化の波形はともにピッチング運動時の揚力の影響が大きいことがわかった。また、フラッピング運動時の揚力の時間平均値は、ヒービング運動やピッチング運動時に比べて大きくなった。特に、**Baseline** の場合において、揚力波形の振幅は、ヒービング運動とピッチング運動の位相差が 0° のときに最も大きくなり、 180° の時に最も小さくなった。位相差の違いにより揚力振幅が変化する原因は、揚力最大位相では、ヒ

ービング加速度の違いにより翼上面への流れの付着のしやすさが変化するためであることがわかった。

また、Wave の場合では、ヒービング運動やピッチング運動の場合と同様に、Baseline に比べて揚力の振動振幅が小さくなることがわかった。その原因は、揚力最大位相では Wave の翼前縁に剥離泡が形成されることで翼前縁上面付近の負圧が弱まり、揚力の上昇が抑制されるためであることがわかった。また、揚力最小位相では、Wave の翼前縁で作成された縦渦が、剥離領域に主流の運動量を供給することで剥離領域を小さくし、揚力の低下を抑制するためであることがわかった。

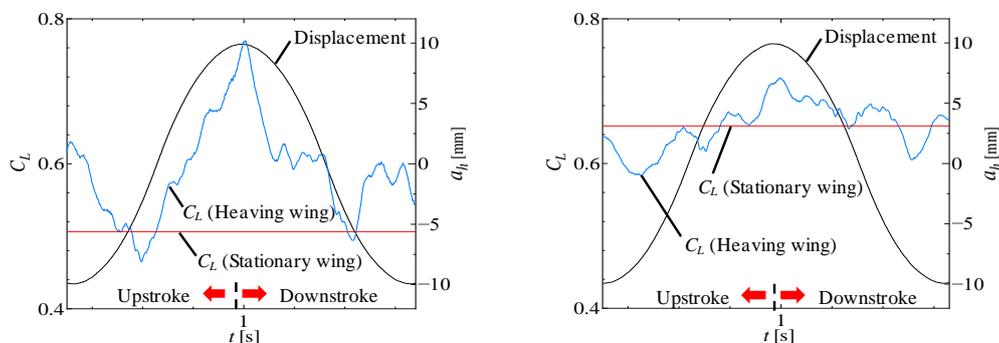


図6 揚力の時間変化 ($f_h=1.5$ Hz, $\alpha_h=7.5^\circ$)

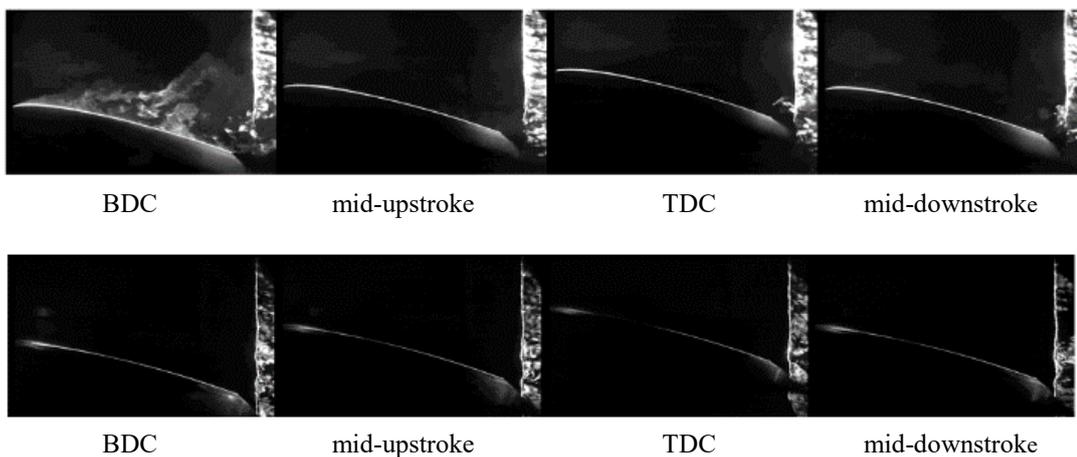


図7 翼周りの流れ場の時間変化 (上: Baseline, 下: Wave, $f_h=1.5$ Hz, $\alpha_h=7.5^\circ$)

(4) 翼端流れが流体力に与える影響

翼端流れが流体力に与える影響を調べるために、翼端板を外して流体力の測定を行った。その結果、翼端板と翼端板がない場合の結果が定性的には同じであったが、定量的には揚力抗力共に減少した。また、その減少割合はヒービングやピッチングの周波数や振幅が大きくなるほど顕著であることがわかった。今回の実験条件では前縁形状の違いによる翼端流れへの影響は見られなかった。

(5) まとめ

本研究により、ヒービング運動、ピッチング運動、フラッピング運動のいずれの運動に対しても、Baseline では静止翼に対する揚力の増加が見られた。また、Wave では、固定翼の場合でも剥離が抑制され揚力が大きくなるため、Baseline に比べて、運動時の平均揚力の増加割合は減少した。一方で、運動時においても Wave の剥離抑制の効果は見られるため、平均揚力自体は Baseline より高く、さらに揚力の振動振幅も小さくなった。

従来の前縁波形状翼に関する研究は固定した翼を対象にしており、羽ばたき運動する前縁波形状翼を取り扱った研究は無い。そのため、本研究で明らかにした前縁波形状翼の運動時の流体力特性やその発生機構は重要な知見と考えられる。また、前縁波形状翼がどの運動条件においても変動が少なく、かつ、高い揚力を出せることを示した結果は、効率的な魚型水中調査機器の開発の一助となることが期待できる。

<引用文献>

①土井一輝、安田孝宏、中田瑛、南川久人、ピッチング運動する前縁波形状翼の非定常流体力特性に関する研究、日本機械学会論文集、89巻、924号、2023、23-00095

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 DOI Kazuki, YASUDA Takahiro, NAKATA Aki, MINAGAWA Hisato	4. 巻 89
2. 論文標題 A study on unsteady fluid-dynamic force characteristics of a pitching wing with leading edge protuberance	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Transactions of the JSME (in Japanese)	6. 最初と最後の頁 1-15
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1299/transjsme.23-00095	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 中田瑛、安田孝宏、南川久人
2. 発表標題 A Study of Fluid Dynamic Force Acting on Heaving Wing with Leading Edge Protuberance
3. 学会等名 ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conference 2023（国際学会）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 土井 一輝, 安田 孝宏, 南川 久人
2. 発表標題 運動する前縁波形状翼の翼性能に関する研究
3. 学会等名 日本機械学会第99 期流体工学部門講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田崎将太, 安田孝宏, 南川久人
2. 発表標題 運動する前縁波形状翼の翼性能に関する研究
3. 学会等名 日本流体力学会年会2020
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	南川 久人 (Minagawa Hisato) (60190691)	滋賀県立大学・工学部・教授 (24201)	

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 協力者	田崎 将太 (Tazaki Shota)		
研究 協力者	土井 一輝 (Doi Kazuki)		
研究 協力者	中田 瑛 (Nakata Aki)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------